

Розділ 7

МОДЕЛЮВАННЯ КРАЙОВИХ ЗАДАЧ ПРО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТІЛ. ДИНАМІКА

MSC.Nastran для розв'язування крайових задач про напружено-деформований стан (НДС) тіл застосовує постановку задачі у переміщеннях з використанням варіаційного принципу Лагранжа та методу скінченних елементів. Такі розрахунки можуть вимагати дуже значні об'єми оперативної та ще більше дискової пам'яті, а також займати багато часу на етапі обчислення. Це тому, що метод скінченних елементів породжує велику за розміром систему алгебраїчних рівнянь, яка займає багато пам'яті ПЕОМ та відносно довго розв'язується.

Основні теоретичні відомості про динамічні крайові задачі про НДС тіл наведені у Додатку 6.

7.1. Загальні відомості щодо моделювання динамічних крайових задач

У середовищі MSC.Nastran матриці основного рівняння динамічного процесу (Дб.11) формуються з використанням таких даних:

- матриця жорсткості тіла $[K]$ – про пружні характеристики матеріалу (як і у статичному аналізі);
- матриця мас $[M]$ – про масу матеріалу (через щільність матеріалу „**Mass Density**”); про неконструктивну (додаткову) масу CE „**Nonstructural Mass**” (див. Розділ 3.2); про зосереджену масу CE типу **MASS** та **MASS MATRIX** (див. розділи Додатків Д3.4.1 та Д3.4.2);
- матриця в'язкого демпфірування $[C]$ – про коефіцієнт конструктивного демпфірування матеріалу „**Damping**” $G = 2C / C_o$ (див. Розділ 3.1), який визначається при резонансній частоті (тут C – коефіцієнт еквівалентного в'язкого демпфірування матеріалу); про загальний коефіцієнт демпфірування CE (типів **SPRING**, **DOF SPRING** та **LAMINATE**); про загальний коефіцієнт конструкційного демпфірування тіла G .

Демпфірування є сенс враховувати не завжди, а при:

- коливаннях тіл при частотах сил, що вимушують, наближених до резонансних;
- при моделюванні перехідних процесів коливань тіл, які продовжуються значно довше, ніж період коливань тіла.

7.2. Завдання параметрів динамічних розрахунків

Тільки для динамічних розрахунків усім типам факторів, що задаються на діалоговій панелі „**Create Loads on ...**” (див. рис.4.3-а) як граничні умови, можна призначити таку додаткову характеристику, як *фазу* змінювання. Фазу можна задавати або як постійне значення, або як залежне від функції типу **1..vs. Time** або **3..vs. Frequency**.

Увага: якщо в одній ступені свободи вузла (**DOF**) будуть призначені декілька ГУ, що залежать від функцій типу **1..vs. Time**, **2..vs. Temperature** або **3..vs. Frequency**, з *неузгодженими* характеристиками, то при перетворенні ГУ до елементів СЕС (див. Розділ 4.1.4.6) або при запуску процесу розв'язування задачі з'являться повідомлення з проханням узгодити ГУ. Якщо цього не зробити, можна отримати такі варіанти реагування FEMAP: ігнорування деяких призначень або фатальну помилку, тобто незадовільний результат.

Оскільки для різних динамічних задач можуть використовуватися однакові діалогові панелі та призначення на них, то такі відомості зведено у цьому розділі.

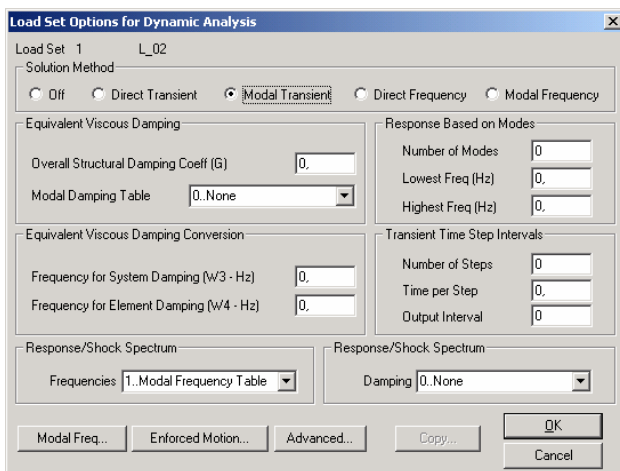
Командою **Model→Load→Dynamic Analysis...** викликається діалогова панель „**Load Set Options for Dynamic Analysis**” (див. рис.7.1-а).

У секціях панелі вказується:

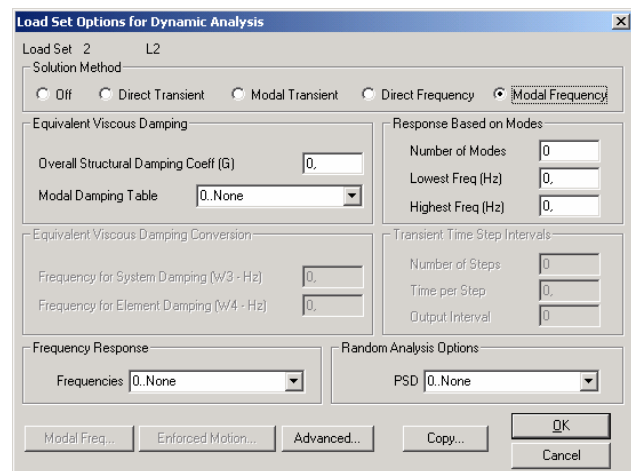
- у „**Solution Method**” – метод розв’язування задачі: прямий еволюційний аналіз (**Direct Transient**), модальний еволюційний аналіз (**Modal Transient**), прямий (**Direct Frequency**) або модальний (**Modal Frequency**) частотний аналіз;

- у „**Equivalent Viscous Damping**” (еквівалентне в’язке демпфірування) – загальний коефіцієнт конструкційного демпфірування (**Overall Structural Damping Coeff (G)**) або у діалоговому вікні „**Modal Damping Table**” обирається раніш створена таблиця коефіцієнтів демпфірування (для кожного з тонів рівняння (Дб.29) для методів розкладання по формам власним коливань, тобто „**Modal Transient**” та „**Modal Frequency**”). Коефіцієнт G можна не задавати, якщо його задано для усіх СЕ як властивість матеріалу СЕ, або можна задати як додаткову величину до заданого для матеріалу;

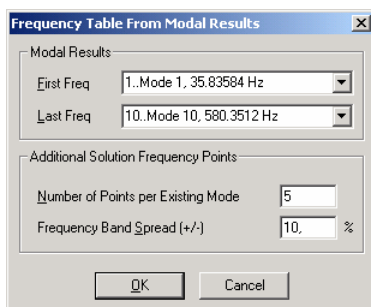
- у „**Equivalent Viscous Damping Conversion**” (перетворення в еквівалентне в’язке демпфірування) – частота ω (у герцах) для перетворення: загального коефіцієнту G (**Frequency for System Damping (W3 – Hz)**) або заданих у властивостях матеріалу СЕ (**Frequency for Element Damping (W4 – Hz)**) за формулою $G = (2C / C_o) \cdot (\omega / \omega_o)$, де ω_o – частота власних коливань. Звичайно величину ω задають близькою до першої власної частоти;



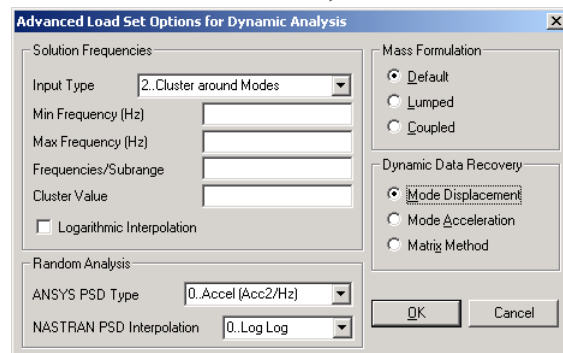
а)



б)



в)



г)

Рис.7.1. Діалогові панелі: а), б) – завдання опцій та параметрів динамічного аналізу; в) – формування таблиці власних та додаткових частот коливань; г) – призначення додаткових параметрів

- у „**Response Based on Modes**” (відгук, що оснований на формах власних коливань; для методів **Modal ...**) – кількість форм власних коливань, які будуть використовуватися для розрахунків відгуку (**Number of Modes**) або (як альтернатива) відповідний частотний діапазон: нижнє (**Lowest Freq (Hz)**) та верхнє (**Highest Freq (Hz)**) значення;

- у „**Transient Time Step Intervals**” (інтервал та крок розрахунку, для методів **... Transient**) – кількість кроків (**Number of Steps**), часовий крок (**Time per Step**) та інтервал для виводу результатів (**Output Interval**) у формі множника до кроку розрахунків (якщо 0 або 1 – вивід на кожному кроці, якщо ціле число $N > 1$ – через N кроків);

- у (лівому) „**Response/Shock Spectrum**” (спектр відклику/удару, для методів ... **Transient**, див. рис.7.1-а) або у „**Frequency Response**” (частотний спектр, для методів ... **Frequency**, див. рис.7.1-б) у полі „**Frequencies**” можна обрати раніш створену таблицю частот (як функцію типу **3..vs. Frequency**, причому використовуються тільки значення параметра **X** таблиці). Якщо попередньо був зроблений розрахунок власних частот коливань тіла, то таку таблицю можна створити автоматично, оскільки стане активною електронна кнопка „**Modal Freq...**” (власні частоти). Вона викликає діалогову панель „**Frequency Table From Modal Result**” (див. рис.7.1-в), де можна сформувати таблицю частот власних коливань та (у їх околу) додаткових частот коливань (обрати діапазон частот (перша – „**First Freq**” та остання – „**Last Freq**”), у полі „**Number of Points per Existing Mode**” вказати кількість точок у околу кожної власної частоти, у полі „**Frequency Band Spread**” – ширину частотної смуги у % від абсолютного значення відповідної власної частоти). Створену таблицю доцільно переглянути за допомогою команд **Modify**→**Edit**→**Function...** (як таблицю) або **View**→**Select...** (як графік). Ця таблиця використовується для побудови амплітудно-частотної характеристики моделі або для завдання власних частот осциляторів малої маси, які зв’язані з даною точкою конструкції для оцінки спектрального відгуку при сейсмічних або ударних впливах;

- у (правому) „**Response/Shock Spectrum**” (для методів ... **Transient**, див. рис.7.1-а) у полі „**Damping**” можна обрати раніш створену таблицю коефіцієнтів демпфірування осциляторів (як функцію типу **3..vs. Frequency**);

- у „**Random Analysis Options**” (розрахунок випадкових коливань, для методів ... **Frequency**, див. рис.7.1-б) можна завдати закон основного руху у формі раніше створеної таблиці (як функції типу **3..vs. Frequency**).

Електронною кнопкою „**Advanced...**” можна викликати діалогову панель „**Advanced Load Set for Dynamic Analysis**” (див. рис.7.1-г) для призначення додаткових параметрів аналізу. У секції „**Mass Formulation**” можна обрати один з варіантів опису матриці мас: „**Default**”, „**Lumped**” (зосереджений) або „**Coupled**” (з’єднаний); у секції „**Dynamic Data Recovery**” – один з варіантів динамічного відтворення даних: „**Mode Displacement**”, „**Mode Acceleration**” або „**Matrix Method**”. У секції „**Solution Frequencies**” (тільки для методів ... **Frequency**, див. рис.7.1-а) можна призначити діапазон обчислення власних частот („**0..Default/List**”, тобто за замовчанням; або „**1..Frequency Range**”, тобто діапазон частот: „від і до”, а також загальну їхню кількість; або „**2..Cluster around Modes**” (внутрішня команда **FREQ3**), тобто амплітудний діапазон частот (**Cluster Value**) навколо частоти зі вказаним номером (**Frequencies/Subrange**); або „**3..Spread around Modes**” (внутрішня команда **FREQ4**), тобто відстань (+, – або у відсотках) від частоти або форми коливань зі вказаним номером (**Frequencies/Mode**)), а також встановити опцію „**Logarithmic Interpolation**” (логарифмічна інтерполяція). Про призначення у секції „**Random Analysis**” – у Розділі 7.3.4.

Примітка 7.1. Окрім **FREQ3** і **FREQ4** у MSC.Nastran 2001 ще є й інші варіанти (від **FREQ** до **FREQ5**). За допомогою інструментів, описаних у Розділі 4.2.3, можна задати одну з них або будь-яку їхню комбінацію з потрібними параметрами.

За допомогою електронної кнопки „**Enforces Motion...**” можна підключити до тіла значну масу, яка вібрує або рухається за іншим законом (див Розділ 7.3.3), а кнопки „**Copy**” – скопіювати всі призначення з іншої моделі, якщо вона є.

7.3. Моделювання динамічних крайових задач про НДС тіл

7.3.1. Крайова задача про власні частоти та форми коливань

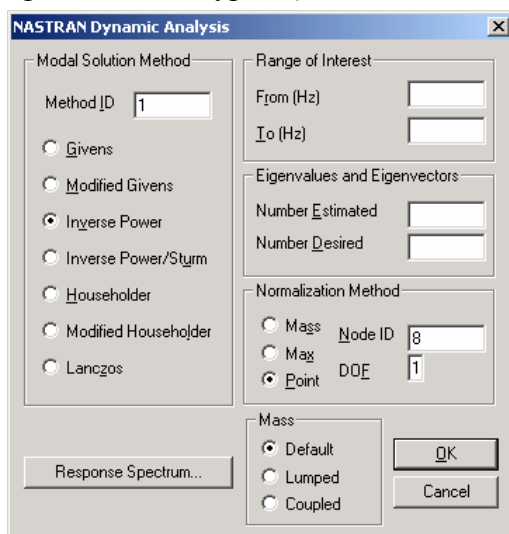
Серед властивостей матеріалу достатньо задати модулі Юнга та зсуву, коефіцієнт Пуассона та щільність матеріалу (див. табл.3.1). **Увага:** в основних типах задач MSC.Nastran (див. табл.4.1) при розрахунках власних форм та частот коливань усі характеристики демпфірування (що задаються, зокрема, і величиною $2C/C_0$ для матеріалу) – ігноруються. Для урахування характеристик демпфірування потрібно застосовувати додаткові типи задач (див. табл.Д8.3, Д8.4 та Розділ 4.2.3).

Звичайно вводяться умови закріплення тіла, але MSC.Nastran може знаходити власні форми та частоти коливань для тіл, які не мають закріплення, наприклад, літака у польоті.

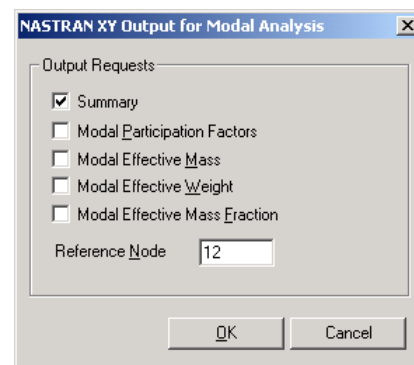
При запуску процесу розв'язування задачі на діалоговій панелі „**NASTRAN Analysis Control**”, що викликається командою **File**→**Analysis...**, потрібно встановити тип задачі „**2.. Normal Modes / Eigenvalues**”, а також вказати кількість власних форм, яку необхідно одержати (**Number of Modes**), або частотний діапазон („**From**” (Від) – „**To**” (До), у герцах).

Якщо застосувати кнопку „**Advanced...**”, то додатково до описаних у Розділі 4.2 з'явиться діалогова панель „**NASTRAN Dynamic Analysis**” (див. рис.7.2-а) для додаткового настроювання процесу модального аналізу. На ній можна:

- змінити (**Method ID**) внутрішній номер субнабору призначень (якщо передбачається багатоваріантні розрахунки);
- обрати метод визначення власних форм та частот коливань. Це методи Ланцоша (**Lanczos**) – основний, Гівенса (**Givens**), Хаусхолдера (**Householder**), модифіковані методи Гівенса та Хаусхолдера, а також оборотні методи: енергетичний (**Inverse power method**) та модифікований Штурма (**Sturm modified inverse power method**);



а)



б)

Рис.7.2. Діалогові панелі для зміни параметрів: а) – динамічного аналізу; б) – для зміни параметрів поміщення додаткової інформації до файлу *.f06

- у секції „**Range of Interest**” – вказати бажаний діапазон частот (як альтернатива призначеному на панелі „**NASTRAN Analysis Control**”);
- у секції „**Eigenvalues and Eigenvectors**” – задати бажану кількість (**Number Desired**) власних форм коливань для нижніх власних частот (це теж альтернатива призначеному на панелі „**NASTRAN Analysis Control**”). А також тільки для методу „**Inverse power**” – кількість оригінальних коренів (**Number Estimated**) системи рівнянь (Д6.22). Нагадаємо, що можливі парні значення власних частот;
- у секції „**Normalization Method**” – встановити метод нормування власних форм коливань. Є три варіанта нормування (до одиниці): за масою (**Mass**), щоб виконувалося рівняння (Д6.24); за максимальним переміщенням будь-де (**Max**) або для вказаної ступені свободи обраного вузла (**Point**). Звичайно застосовують перший варіант, але й інші бувають корисні, наприклад, для порівняння з результатами випробувань;
- у секції „**Mass**” – обрати один з варіантів опису матриці мас: „**Default**”, „**Lumped**” (зосереджений) або „**Coupled**” (з'єднаний).

Після команди „**OK**” з'явиться діалогова панель „**NASTRAN Executive and Solution Control**” (див. Розділ 4.2.3.1. та рис.4.7). Після її настроювання та команди „**OK**” з'явиться наступна діалогова панель – „**NASTRAN XY Output for Modal Analysis**” (див. рис.7.2-б), на якій можна вказати, яку додаткову інформацію виводити у файл результатів з розширенням імені **.f06**. Якщо не призначити номер вузла, то дані будуть виводитися для точки з нульови-

ми координатами. FEMAP занесе цю інформацію у XY-функцію, яку можна переглянути звичайним чином.

Потім з'явиться діалогова панель „**NASTRAN Case Control**” (див. Розділі 4.2.3.2 та рис.4.8); потім – інші (див. Розділ 4.2.3.3).

Цей тип крайової задачі можна розв'язувати із застосуванням внутрішнього аналізатора FEMAP з назвою FEMAP Structural. Для цього потрібно спочатку створити шаблон аналізу (див. Розділ 4.2.5).

Після закінчення розрахунків буде одержано відповідну кількість таблиць з характерними назвами, наприклад, **20..Mode 20, 46.88064 Hz**. Перегляд цих форм доцільно проводити у режимі анімації переміщень (див. Розділ 8.3).

7.3.2. Крайова задача про перехідний процес при динамічному негармонійному навантаженні тіла

Граничні умови, що змінюються у часі за законом синусу чи косинусу, звуться гармонійними, а всі інші – негармонійними.

Звичайно негармонійні силові навантаження задаються змінними у часі за допомогою функцій типу „**1..vs. Time**”, які створюються завчасно та обираються на діалоговій панелі „**Create Loads on ...**” (див. рис.4.3 та інші подібні) у полі „**Function Dependence**”.

Якщо задача – лінійна, то вона може розв'язуватися двома методами.

7.3.2.1. Метод прямого інтегрування

Основне рівняння динамічного процесу (Дб.11) безпосередньо інтегрується із застосуванням методу Ньюмарка (див. Розділ Дб.3.1 Додатків).

Початкові умови формуються за переміщеннями (**Displacement**) та швидкостями переміщень (**Velocity**) у окремому наборі навантажень звичайним чином. Якщо вони – нульові, то набір з початковими умовами можна не створювати (не підключати). Початкові прискорення – тільки нульові.

Звичайно для визначення часового кроку розрахунку (**Time per Step**) і повного часу дії навантаження, а також для завдання коефіцієнту конструкційного демпфірування G (див. Розділ 7.2) потрібно знати період коливань тіла (**Frequency for System Damping (W3 – Hz)**), тобто одну (першу) або декілька власних частот коливань. Для цього спочатку необхідно провести відповідний додатковий розрахунок (див. Розділ 7.3.1). Вважається, що для досягнення більш-менш значної точності інтегрування рівняння (Дб.11) за період повинно бути ніяк не менш 10 часових кроків, а повний час розрахунку повинен у декілька разів перевищувати період коливань, щоб можна було відстежити значну частку процесу затухання коливань, обумовлених швидкою зміною навантажень. Ці параметри розрахунку необхідно встановити на діалоговій панелі „**Load Set for Dynamic Analysis**”, яка викликається командою **Model→Load→Dynamic Analysis...**, у варіанті задачі „**Direct Transient**” (див. Розділ 7.2).

При запуску процесу розв'язування задачі на діалоговій панелі „**NASTRAN Analysis Control**”, що викликається командою **File→Analysis...**, потрібно встановити тип задачі „**3..Transient Dynamic / Time History**” (перехідний динамічний / процес у часі); встановити, які результати виводити в таблиці (**Output Types**); підключити набори з навантаженнями (**Loads**), закріпленнями (**Constraints**) і початковими умовами (**Initial Conditions**).

Як результат розрахунків виникають стільки таблиць, скільки задано часових кроків. З них можна формувати різні графіки, зокрема зміни у часі обраної величини в обраному вузлі (див. Розділ 8.4). Також можна розрахувати коефіцієнт динамічності у обраному вузлі:

$$K_{dynamic} = \sigma_{dynamic} / \sigma_{static}$$

7.3.2.2. Метод розкладання за власними частотами

Метод описано у розділі Дб.3.3 Додатків. Задача розв'язується за два етапи: спочатку знаходиться вказана кількість *перших* власних форм коливань, потім інтегрується не більша кількість рівнянь. **Увага:** у MSC.Nastran власні форми коливань розраховуються без врахування призначених характеристик демпфірування, тому цей метод дає погрішність розв'язку тим вищу, чим значніше характеристики демпфірування.

Примітка 7.2. Якщо для застосування першого методу потрібно додатково провести розрахунок власних частот коливань тіла (звичайно потребується при першому розрахунку), то начебто вигідніше застосовувати другий метод. Але потрібно мати на увазі, що відсікання високочастотних характеристик відсікає й високочастотну реакцію. Більш того, рекомендують обчислювати десь у 2...3 рази вищі частоти, ніж ті, для яких потрібно визначити реакцію.

На першому етапі при ініціюванні процесу розрахунку власних форм коливань необхідно на діалоговій панелі „**NASTRAN Analysis Control**” додатково ініціювати електронну кнопку „**Restart**”; на діалоговій панелі „**NASTRAN Restart Control**”, що з’явиться, обрати варіант „**Save database for Restart**” (зберегти базу даних для наступного розрахунку).

На другому етапі на діалоговій панелі „**Load Set for Dynamic Analysis**”, яка викликається командою **Model→Load→Dynamic Analysis...**, необхідно встановити варіант задачі „**Modal Transient**” (див. Розділ 7.2) та ввести інші параметри розрахунку. Зокрема, вказати кількість власних частот (**Number of Modes**), яку застосувати для одержання розв’язку.

У цьому варіанті з’являється можливість задавати у полі „**Modal Damping Table**” коефіцієнт конструкційного демпфірування G табличними функціями типу „**6.Structural Damp vs. Freq**” (конструкційне демпфірування), „**7.Critical Damp vs. Freq**” (критичне демпфірування, тобто величина C/C_o) або „**8.Q Damping vs. Freq**” (добротність, або коефіцієнт підсилювання – величина $Q = 1/\sqrt{(1 - (\omega/\omega_o)^2)^2 + G^2}$, де ω_o – частота власних коливань). Функцію, як і завжди, потрібно створити заздалегідь. При $\omega = \omega_o$ реалізується співвідношення $G = 2C/C_o = 1/Q$. Якщо G задається таблицею, то поля для „**Frequency for System Damping (W3 – Hz)**” та „**Frequency for Element Damping (W4 – Hz)**” не заповнюються (нульові). Докладніше про ці величини – у Розділі 7.2.

Запуск процесу розв’язування задачі, зокрема підключення силових, кінематичних та початкових умов, інші дії та отримані результати – аналогічно розглянутому у Розділі 7.3.2.1. З однією відмінністю: потрібно ініціювати електронну кнопку „**Restart**”; на діалоговій панелі „**NASTRAN Restart Control**”, що з’явиться, обрати варіант „**Restart Previous Analysis**” (застосувати попередній аналіз), інакше власні форми коливань будуть розраховуватися знову. З’явиться стандартне діалогове вікно, за допомогою якого потрібно знайти та „відкрити” файл рестарту (з розширенням імені **.master**).

7.3.2.3. Нелінійний перехідний процес

Основне рівняння динамічного процесу (Д6.11) – нелінійне. Воно безпосередньо інтегрується із застосуванням методу Ньюмарка (див. Розділ Д6.3.1 Додатків). Тобто задача близька до задачі, розглянутої у Розділі 7.3.2.1. Але, оскільки задача – нелінійна, є деякі відмінності (у порівнянні з Розділом 7.3.2.1) при її моделюванні. А саме:

- як й у Розділі 7.3.2.1 на діалоговій панелі „**Load Set for Dynamic Analysis**”, яка викликається командою **Model→Load→Dynamic Analysis...**, необхідно встановити варіант задачі „**Direct Transient**” та ввести інші параметри розрахунку (див. Розділ 7.2). **Увага:** варіант „**Modal Transient**” викликає фатальну помилку;

- вже для першого набору навантажень, що буде створюватися, необхідно на діалоговій панелі „**Load Set Options for Nonlinear Analysis**” (див. рис.6.9-а), яка викликається командою **Model→Load→Nonlinear Analysis...**, спочатку кнопкою „**Default**” встановити типові значення, потім у секції „**Solution Type**” обрати варіант „**Transient**”, а також зробити необхідні призначення (див. Розділ 6.2);

- при запуску процесу розв’язування задачі на діалоговій панелі „**NASTRAN Analysis Control**”, що викликається командою **File→Analysis...**, потрібно встановити тип задачі „**12.Nonlinear Transient Analysis**” (нелінійний перехідний процес); встановити, які результати виводити у таблиці (**Output Types**), підключити набори з навантаженнями (**Loads**), закріпленнями (**Constraints**) та початковими умовами (**Initial Conditions**). При необхідності можна встановити опцію „**Large Disp**”, тобто застосувати загальний підхід Лагранжа для опису значних деформацій.

7.3.2.4. Спектральний відгук тіла при ударному навантаженні

Часто розглядається задача про зниження амплітуд коливань тіла за рахунок демпферів (пристроїв, що гасять динамічну енергію), які можна прикріпити до декількох його точок (вузлів). Які повинні бути властивості демпфірування цих демпферів? Ця задача приводить до багатоваріантних однотипних розрахунків. У MSC.Nastran їх можна поєднати в одному розрахунку.

Це й є задача про спектральний відгук тіла (конструкції). Задача розв'язується за два етапу: спочатку для отримання деякої інформації знаходиться задана кількість власних форм коливань (як це описано у Розділах 7.3.1. та 7.3.2.2), потім – спектральний відгук.

На другому етапі звичайно потрібно мати три функції:

- типу **1..vs. Time** для описання динамічного навантаження – удару у вигляді швидкоплинного сплеску (див. рис.7.4-а). Потім функція обирається у діалоговому вікні „**Create Loads on ...**” у полі „**Function Dependence**” для масштабуванні у часі амплітудного значення навантаження, що призначається;

- типу **3..vs. Frequency** у вигляді стовпця таблиці (тільки аргумент **X**) значень частот актуального діапазону для наступного її заповнення (за результатами розв'язку задачі) відповідними значеннями переміщень, швидкостей та інше (значення функції **Y**) у вузлах, до яких „прикріплені” демпфери, тобто для створення таблиць спектрального відгуку;

- типу **3..vs. Frequency** у вигляді таблиці значень C/C_0 коефіцієнтів демпфірування демпферів (тільки аргумент **X**). Для кожного з цих коефіцієнтів буде отримано таблицю (графік) спектрального відгуку.

Потім обидві функції типу **3..vs. Frequency** обираються на діалоговій панелі „**Load Set for Dynamic Analysis**” (рис.7.1-а, викликається командою **Model→Load→Dynamic Analysis...**) у полі „**Frequencies**” лівої та у полі „**Damping**” правої частини секції „**Response/Shock Spectrum**” відповідно (додаткову інформацію див. у Розділі 7.2). Тип задачі, що встановлюється на цій панелі – „**Direct Transient**”, тому інші призначення повинні відповідати описаному в Розділі 7.3.2.1.

При запуску процесу розв'язування задачі на діалоговій панелі „**NASTRAN Analysis Control**”, що викликається командою **File→Analysis...**, потрібно встановити тип задачі „**5.Response Spectrum**” (спектральний відгук) та провести інші призначення (докладніше див. у Розділі 7.3.2.1.). Після команди „**OK**” з'явиться діалогова панель „**NASTRAN Output for Response Spectrum Analysis**” (див. рис.7.4-б), на якій необхідно вказати напрямки переміщень (**T1, T2, T3**) та/або обертань (**R1, R2, R3**) трьох типів величин: переміщень (**Displacement**), швидкостей (**Velocity**) та/або прискорень (**Acceleration**) у демпферах, що досліджуються у задачі. Також вказується, які величини виводити в таблиці: абсолютні (**Absolute**) або відносні (**Relative**). Потім з'явиться стандартна діалогова панель для обирання вузлів, до яких „прикріплюються” демпфери.

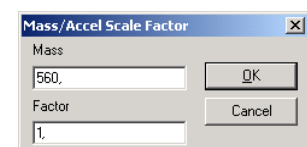
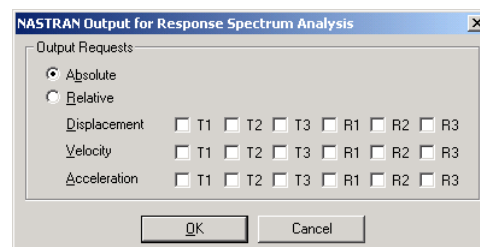
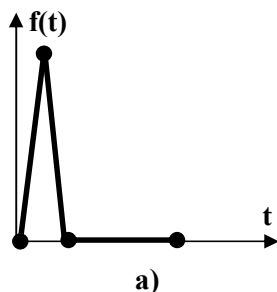


Рис.7.4. Графік функції навантаження (а); діалогові панелі для призначення: б) – напрямків переміщень (T1, T2, T3) та обертань (R1, R2, R3) трьох типів величин; в) – завдання маси та масштабного коефіцієнту для прискорення

Таблиці спектральних відгуків можна або переглянути у режимі редагування функцій (команда **Modify→Edit→Function...**) або у вигляді графіків (дати команду **View→Select**, встановити радіокнопку „**XY of Function**”, ініціювати кнопку „**Model Data**”, обрати функцію). Назва функції – характерна. Наприклад, **ABSDISP1 22 0.05** означає, що це – абсолютні

значення переміщень у напрямку **T1** для об'єкту з номером **22** при коефіцієнті демпфірування демпфера, рівному **0.05**.

7.3.2.5. Розрахунок повної реакції спектрального відгуку тіла

У MSC.Nastran є можливість проведення розрахунку повної реакції спектрального відгуку тіла. На першому етапі знаходиться спектральний відгук тіла (як це описано у Розділі 7.3.2.4), на другому проводиться розрахунок реакції.

На другому етапі спочатку необхідно створити дві додаткові функції:

- типу **16.. Function vs. Critical Damp**, де два значення параметра **X** є номером отриманої на першому етапі таблиці спектрального відгуку, наприклад, таблиці **ABSDISP1 22 0.05**, а параметра **Y** – значення діапазону частот;

- типу **6..Structural Damp vs. Freq, 7..Critical Damp vs. Freq** або **8..Q Damping vs. Freq** залежності обраної характеристики демпфірування від частоти для всього частотного діапазону, який аналізується.

Потім на діалоговій панелі „**NASTRAN Analysis Control**”, що викликається командою **File→Analysis...**, потрібно встановити тип задачі „**2..Normal Modes / Eigenvalues**”.

За допомогою кнопки „**Spectrum...**” необхідно викликати діалогову панель „**NASTRAN Response Spectrum Application**” (див. рис.7.5), на якій:

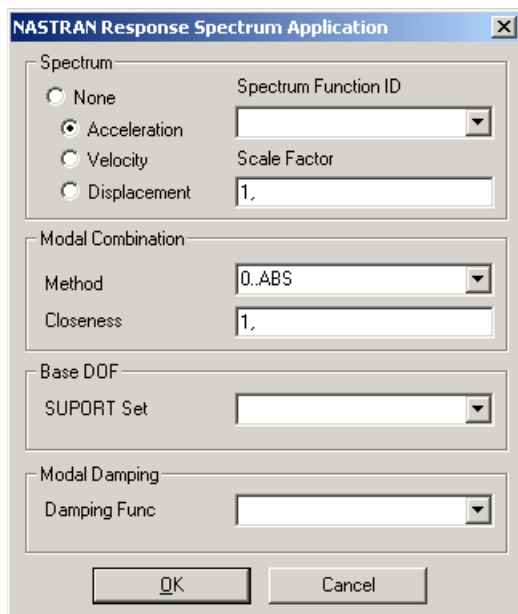


Рис.7.5. Діалогова панель для підготовки розрахунку повної реакції спектрального відгуку тіла

- у секції „**Spectrum**” потрібно обрати один з факторів: „**Acceleration**” (прискорення) „**Velocity**” (швидкість) або „**Displacement**” (зміщення); у полі „**Spectrum Function ID**” – раніше створену функцію типу „**16..Function vs. Critical Damp**”, а у полі „**Scale Factor**” – коефіцієнт масштабування результату. **Увага:** *тип* факторів (прискорення, швидкість або зміщення), що встановлено на панелі та поміщені в обраної функції, повинні співпадати;
- у вікні „**Method**” секції „**Modal Combination**” потрібно обрати один з методів змішування максимальних чутливостей у повну реакцію: **0.ABS** (абсолютні величини), **1.SRSS** (середньоквадратична величина), **2.NRL** (модальна сума, відповідно до проекту МВФ США) або **3.NRLO** (модальна сума, старий варіант). У вікні „**Closeness**” вказується граничне значення частоти: усі методи, окрім **0.ABS**, будуть обробляти тільки ті частоти, що перевищують це значення;
- у полі „**SUPORT Set**” секції „**Base DOF**” потрібно обрати набір з обмеженнями (**Constraint**), призначеними для тіла, а у секції „**Modal Damping**” у полі „**Damping Func**” – раніш створену функцію типу **6..Structural Damp vs. Freq**.

Результати розрахунку – одне число (повна реакція спектрального відгуку), яке можна отримати, переглянувши стандартним чином як **XY**-функції *всі* таблиці спектрального відгуку, які мають той *тип* фактору (прискорення, швидкість або зміщення), що було встановлено на панелі „**NASTRAN Response Spectrum Application**” (див. рис.7.5). „Старе” наповнення цих таблиць можна переглянути лише за допомогою команди **List→Model→Function...**, тобто воно не зникає.

7.3.3. Крайова задача про вимушені гармонійні коливання тіла

Окремий, але досить розповсюджений випадок сил, що викликають коливання тіла – гармонійні сили, тобто такі, що змінюються у часі за законом синусу або косинусу.

Більшість дій при створенні моделі цієї задачі – аналогічна викладеному у Розділі 7.3.2. Вкажемо на деякі відмінності.

Усі величини, що задаються за допомогою команди **Model→Load→...**, повинні залежати від функцій типу **1..vs. Time** або **3..vs. Frequency**, навіть незмінні у часі (тоді значення **Y** такої функції призначається рівним одиниці у всьому діапазоні).

Спочатку потрібно провести частотний аналіз з можливістю подальшого рестарту (див. Розділ 7.3.2.2).

На діалоговій панелі „**Load Set for Dynamic Analysis**” (рис.7.1-а, викликається командою **Model→Load→Dynamic Analysis...**) потрібно обрати тип задачі „**Direct Frequency**” (прямий розв’язок) або „**Modal Frequency**” (модальний розв’язок), ввести потрібні дані. **Увага:** якщо параметри демпфірування не будуть задані, то при резонансному збудженні переміщення – нескінченні (теоретично), тому MSC.Nastran видасть фатальну помилку.

Додатково на цій панелі необхідно ініціювати електронну кнопку „**Modal Freq**” та сформувані для поля „**Frequencies**” секції „**Frequency Response**” таблицю частот з назвою „**Modal Frequency Table**” (розрахункові точки при частотному аналізі, див. Розділ 7.2 та рис.7.1-в): обрати початкову та кінцеву частоти, а також у полі „**Number of Points per Existing Mode**” вказати кількість точок у околі кожної власної частоти, а у полі „**Frequency Band Spread**” – ширину частотної смуги у відсотках від абсолютного значення відповідної власної частоти. Цю таблицю потім можна переглянути звичайним чином за допомогою команд **Modify→Edit→...** або **View→...**

За допомогою електронної кнопки „**Enforces Motion...**” можна підключити до тіла значну масу, яка вібрує. Якщо ця маса значно перевищує масу тіла, що розраховується, то це фактично буде *кінематичним* збудженням цього тіла. Спочатку викликається діалогова панель для призначення точки з „основною масою”, що буде мати прискорення (для створення сили, що вимушує); потім – діалогова панель для обирання вузлів тіла, які будуть жорстко зв’язаними з цією точкою (СЕ типу **RIGID**). Після цього з’являється стандартна діалогова панель завдання силових умов (див. рис.5.2), де задається прискорення основної маси: по-вздовжнє (**Acceleration**) або кутове (**Rotational Acceleration**), яке може залежати або від часу, або від функції часу. Потім з’являється панель „**Mass/Access Scale Factor**” (див. рис.7.2-в), де задається маса (**Mass**) та масштабний коефіцієнт (**Factor**) для прискорення (за замовчанням з’являється значення „**Mass**”, що значно перевищує масу тіла). У підсумку амплітуда динамічної сили, що буде діяти у вказаній точці з „основною масою”, розраховується як результат перемноження значень „**Mass**”, „**Factor**” та „**Acceleration**”. **Увага:** якщо для системи „тіло-маса” в задачі умови закріплення задаватися не будуть, то при запуску процесу розв’язування задачі потрібно „заказати” більшу кількість власних частот коливань, оскільки з’являються декілька нульових або дуже малих частот, які відповідають умовам переміщення системи як жорсткого цілого (ефект числового, завжди наближеного, алгоритму).

При запуску процесу розв’язування задачі на діалоговій панелі „**NASTRAN Analysis Control**”, що викликається командою **File→Analysis...**, потрібно встановити тип задачі „**4..Frequency / Harmonic Response**” (частотний / гармонійний відгук) та провести інші призначення (див. Розділ 7.3.2.1.), зокрема застосувати рестарт. Також за допомогою кнопки „**Advanced...**” можна розпочати процес додаткового налаштування розв’язку та даних виводу задачі. Він вже описаний у Розділі 4.2.3. Є одна відмінність: у секції „**Output Requests**” на діалоговій панелі „**NASTRAN Case Control**” (див. рис.4.8-б) можна замість „**Mag/Phase**” обрати варіант „**Real/Imag**”, тобто вказати, щоб результати виводилися не як амплітуда та фаза, а як дійсна та мніма частина розв’язку.

При перегляді результатів можна побудувати, наприклад, графіки амплітуд переміщень або напружень у обраних вузлах тіла при резонансному збудженні.

7.3.4. Крайова задача про стохастичне збудження тіла

Багато дій – тотожні викладеному в Розділі 7.3.3. Необхідно послідовно:

- провести частотний аналіз тіла з урахуванням умов його закріплення (якщо вони є) та з можливістю подальшого рестарту (див. Розділ 7.3.2.2);
- створити функції залежності навантаження від частоти (типу **3..vs. Frequency**). Якщо деяке навантаження реально не буде залежати від частоти, то відповідна функція повинна

дорівнювати одиниці в усьому діапазоні. Після цього – ввести навантаження, обравши створені функції;

- створити функцію залежності характеристик демпфірування від частоти (типу **7..vs. Critical Damp vs. Freq**). Якщо ці характеристики реально не залежать від частоти, то функція повинна дорівнювати одиниці в усьому діапазоні;

- створити функцію спектральної щільності навантаження (PSD) $S_{\alpha\beta}(\omega)$ (див. Розділ Д6.3.4 Додатків) у залежності від частоти (типу **3..vs. Frequency**). Звичайно ця функція має значення у діапазоні від деякої незначної величини до одиниці. У таблиці Д6.1 наведені деякі аналітичні вирази для таких функцій, їхній графічний вигляд. У поясненнях до таблиці вказані можливі застосовування. У MSC.Nastran 2001 функція PSD може бути у формі авто- або взаємно- спектральної щільності;

- на діалоговій панелі „**Load Set for Dynamic Analysis**” (рис.7.1-а, викликається командою **Model→Load→Dynamic Analysis...**):

- обрати тип задачі „**Modal Frequency**” (модальний розв’язок);

- у секції „**Equivalent Viscous Damping**” (еквівалентне в’язке демпфірування) задати загальний коефіцієнт конструкційного демпфірування (**Overall Structural Damping Coeff (G)**), а у діалоговому вікні „**Modal Damping Table**” обрати раніш створену функцію залежності характеристик демпфірування від частоти (типу **7..vs. Critical Damp vs. Freq**). Нагадаємо, що коефіцієнт G можна не задавати, якщо його задано для усіх СЕ як властивість матеріалу СЕ, або можна задати як додаткову величину до заданого для матеріалу;

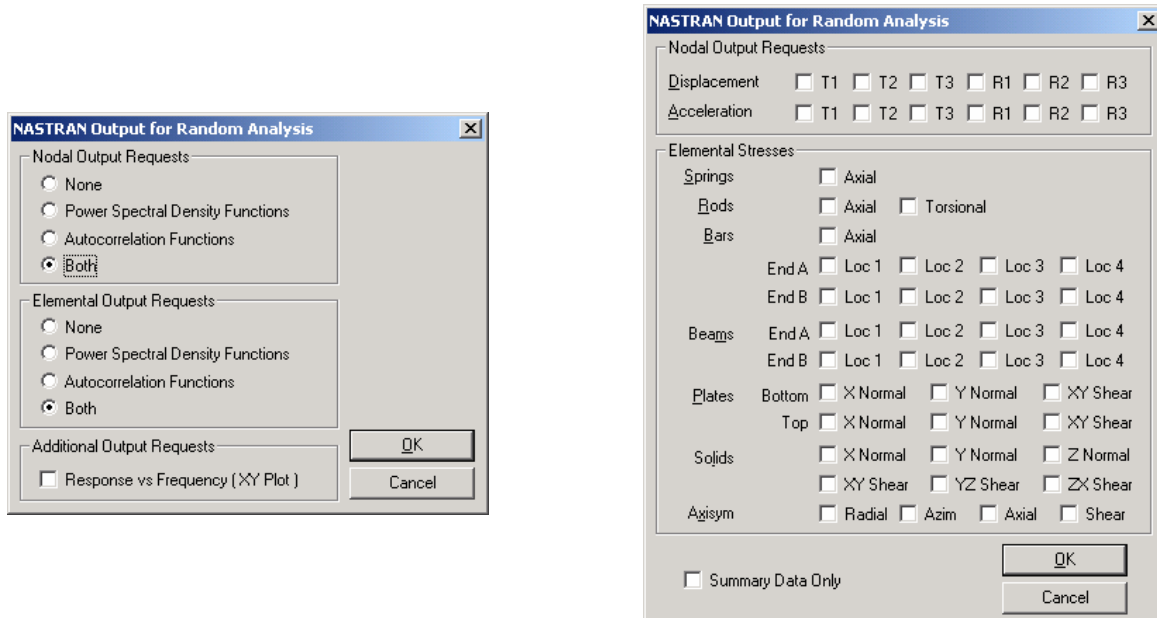
- у полі „**PSD**” секції „**Random Analysis Options**” – підключити створену PSD-функцію спектральної щільності навантаження (вхідного впливу) при випадковому характеру зміни амплітудного значення сили, що збуджує;

- електронною кнопкою „**Advanced...**” можна викликати діалогову панель „**Advanced Load Set for Dynamic Analysis**” (див. рис.7.1-г) для призначення додаткових параметрів аналізу, зокрема, у секції „**Random Analysis**”. У полі „**ANSYS PSD Type**” (характеристики PSD – як у програмі ANSYS) є можливість ввести прискорення: „**0..Accel (Acc2/Hz)**” (через прискорення, у величинах прискорення у квадраті, розділене на частоту), „**1..Accel (g2/Hz)**” (через абсолютні значення прискорення), „**2..Displacement**” (через переміщення), „**3..Velocity**” (через швидкість) або „**4..Force**” (через силу). Є ще поле „**NASTRAN PSD Interpolation**”, тобто метод інтерполяції функції PSD, яка задається у вигляді таблиці: логарифмічний (**0..Log Log**), лінійний (**1..Linear**), логарифмічно-лінійний (**2..X Log,Y Lin**) або лінійно-логарифмічний (**3..X Lin,Y Log**). Інші опції описані наприкінці Розділу 7.2;

- при запуску процесу розв’язування задачі на діалоговій панелі „**NASTRAN Analysis Control**”, що викликається командою **File→Analysis...**, потрібно встановити тип задачі „**6..Random Response**”. Якщо раніше було створено декілька наборів навантажень (**Load Set**), то на панелі буде присутня кнопка „**Loads...**” для їх підключення, якою потрібно скористатися та обрати необхідні набори навантажень. Далі можна обрати два шляхи:

- перший: дати команду „**OK**”. Спочатку з’явиться діалогова панель „**NASTRAN Output for Random Analysis**” (див. рис.7.6-а). На ній можна обрати один з варіантів стандартного виводу: „**None**”, „**Power Spectral Density Function**” (PSD-функція), „**Autocorrelation Function**” (автокореляційна функція) або „**Both**” (обидва останніх варіанта). Можна встановити опцію „**Response vs. Frequency (XY Plot)**” (реакція як функція частоти), тоді далі з’явиться інша панель з тією ж назвою (див. рис.7.6-б), де у секції „**Nodal Output Requests**” можна вказати ступені свободи вузлів (їх потім можна буде обрати за допомогою стандартного діалогу), для яких буде виводитися результати розрахунку (у вигляді XY-графіка); у секції „**Elemental Stresses**” – для яких типів СЕ, видів напружень та точок перерізу лінійних СЕ виводити результати (це будуть напруження); можна встановити опцію „**Summary Data Only**” (тільки сумарні дані). Якщо було підключено 2 або більше наборів навантажень, то з’явиться ще одна діалогова панель „**NASTRAN Power Spectral Density Factors**” (див. рис.7.7) для завдання кореляційних зв’язків між наборами навантажень (**Load Set**). Потрібно в полі „**Correlation Table**” обрати один з рядків. Номери у рядку цієї таблиці відповідають

призначеному навантаженню. Коли випадки – однакові (наприклад, $1 \Rightarrow 1$, $2 \Rightarrow 2$), потрібно у секції „**Edit Correlation Table**” задати ваговий коефіцієнт (**Factor**) та обрати PSD-функцію (зі списку заздалегідь створених) тільки для дійсної (**Real**) частини. А коли випадки різні (наприклад, $1 \Rightarrow 2$), необхідно визначитися, чи корелювати ці випадки, чи ні. Щоб задати кореляцію, потрібно у секції „**Edit Correlation Table**” задати вагові коефіцієнти (**Factor**) та обрати PSD-функції для дійсних (**Real**) і мнимих (**Imaginary**) частин;



а)

б)

Рис.7.6. Діалогові панелі налаштування основного виводу результатів для частотного аналізу

▪ другий: за допомогою кнопки „**Advanced...**” можна розпочати процес додаткового налаштування розв’язку та даних виводу задачі. Він вже описаний у Розділі 4.2.3. Є деякі відмінності. По-перше, якщо на діалоговій панелі „**NASTRAN XY Output for Modal Analysis**” (див. рис.7.2-б) вказати якийсь вузол, то потім послідовно з’являться діалогові панелі, що зображені на рис.7.6; якщо було підключено 2 або більше наборів навантажень, то з’явиться ще одна діалогова панель „**NASTRAN Power Spectral Density Factors**” (див. рис.7.7). Потрібні дії описано вище. По-друге, у секції „**Output Requests**” на діалоговій панелі „**NASTRAN Case Control**” (див. рис.4.8-б) можна буде замість варіанту „**Mag/Phase**” обрати „**Real/Imag**”, тобто вказати, щоб результати виводилися не як амплітуда та фаза, а як дійсна та мнима частина розв’язку.

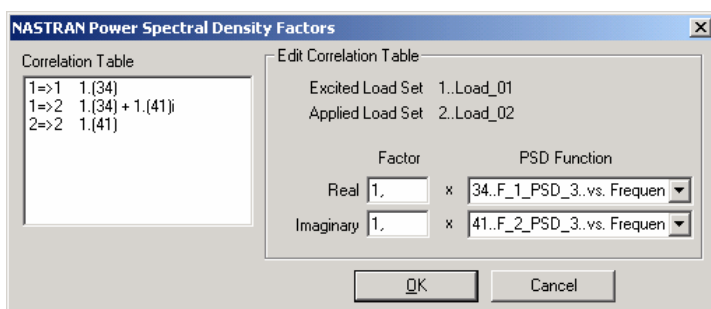


Рис.7.7. Діалогова панель для завдання кореляційних зв’язків

можна переглянути стандартним чином як графік: „**XY vs Set**” – для одного вузла у всьому діапазоні частот; „**XY vs ID**” – для всіх вузлів при обраної частоті.